

# 大型长波天线支撑塔对电气性能影响分析

郭加宁<sup>1</sup>, 谢欢欢<sup>2</sup>

(1 海司信息化部, 北京 100841; 2 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

**摘要:** 大型长波天线通常需要多座高耸铁塔支撑, 接地支撑塔及其纤绳对天线辐射性能有一定影响。传统分析方法为解析法, 有一定局限性, 无法计算局部结构变化对天线电气性能的影响。本文使用基于矩量法的 FEKO 软件对长波天线进行计算仿真, 重点分析支撑塔及其纤绳接地/绝缘对天线电气性能的影响, 通过计算分析得出, 支撑塔及纤绳绝缘能有效地提高天线的有效高度, 从而提高辐射效率, 为长波天线工程实施起重要的指导作用。

**关键词:** 长波天线; 支撑塔; 有效高度

中图分类号: TN822

文献标识码: A

文章编号: 1674-7976-(2014)03-201-04

## Research on Influence of Supporting Tower to Electrical Properties of Large Long-Wave Antenna

*GUO Jianing, XIE Huanhuan*

**Abstract:** Large long-wave antennas usually have several supporting towers. The supporting tower and ropes can affect the antenna radiation property. Traditional calculation method of long-wave antenna is analytic method, which has certain limitations such as being unable to calculate the effect of local structure changing on the electrical properties of the antenna. The FEKO software based on MOM is used to calculate long-wave antennas in this paper. The effect of supporting towers and ropes insulation on the electrical properties of long-wave antennas is analyzed. According to the calculation, it can be found that the supporting tower insulation can improve the resonance frequency and the effective height of the antenna, which provide the guidance in the long-wave antenna engineering.

**Key words:** Long-Wave Antenna; Supporting Tower; Effective Height

## 0 引言

与高频段的电磁波相比, 长波天线发射的甚低频电磁波具有传播稳定、对海水穿透能力强等优点, 历来将其用于授时、导航、潜艇和远洋舰船的发信等。大型长波发射天线是工作在高电压、大电流状态下的电小天线, 其占地面积大、架设高、建

设周期长、工程造价昂贵<sup>[1-2]</sup>。大型长波天线工程建设必须要保证一次建设成功, 因而在长波天线建设的方案阶段, 需要认真考虑各种因素对天线性能的影响, 选择合适的天线建设方案。

大型长波发射天线为了提高系统功率容量, 通常体积庞大, 一般由多座几百米高的铁塔支撑起庞大的顶线线网组成。这些高耸的铁塔多数都起得是支撑线网的作用, 一般均与大地相接, 并且铁塔的多层纤绳也是接地连接。当天线辐射时, 为数众多的接地支撑塔及纤绳一般会在其上产生反向的感

应电流，其二次辐射会降低天线在远区场的电磁波场强，从而消弱天线的辐射能力。

传统长波天线电气参数计算方法为解析方法<sup>[1-3]</sup>，该方法存在一定局限性，其仅用于规则、简单的天线模型进行计算分析，不能考虑天线局部结构的变化对其电气性能的影响。随着计算机硬件和电磁分析软件的进步，全波分析法在长波天线电气参数计算中起着越来越重要的作用。本文使用基于矩量法的 FEKO 电磁计算软件对长波天线进行分析，以澳大利亚的 NWC 长波发射天线<sup>[4-7]</sup>为模型，计算长波天线支撑塔及其纤绳接地/绝缘对天线电气性能的影响。

## 1 天线模型及分析

NWC 长波天线模型如图 1 所示，天线为伞形结构，由六组菱形顶线线网和下引线构成，使用了 13 座铁塔及其纤绳对整个天线系统进行支撑。中心支撑铁塔的高度为 390m；内圈 6 座支撑铁塔的高度为 357m，离中心支撑铁塔的距离为 647m；外圈 6 座支撑铁塔的高度为 303m，离中心支撑铁塔的距离为 1257m。每座支撑铁塔由三方五层纤绳进行固定，铁塔和纤绳均为接地连接。长波天线固有特征的重要参数主要有静态电容  $C_0$ 、有效高度  $h_e$  和自谐振频率  $f_0$ 。

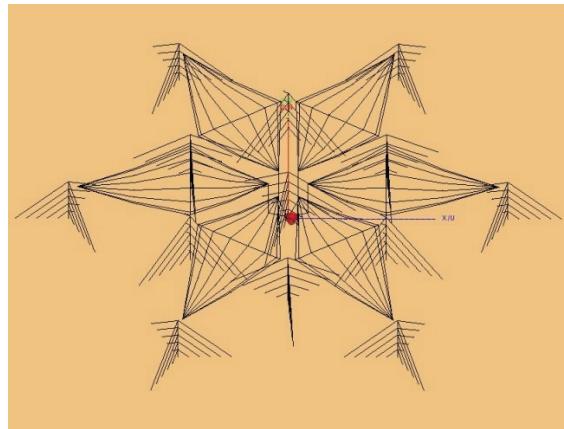


图 1 NWC 天线模型

天线的静态电容  $C_0$  是工作频率为 0Hz 时的电容。静态电容是孤立导体的电荷与电位的比，表达式为：

$$C = \frac{Q}{\phi} \quad (1)$$

式中， $Q$  是天线的总电荷， $\phi$  是电位。如图 1 所示的 NWC 天线，天线的电荷包括两部分，分别是顶线线网上的电荷和垂直部分的电荷（包括支撑塔感应电荷和下引线电荷），其静态电容可表示为：

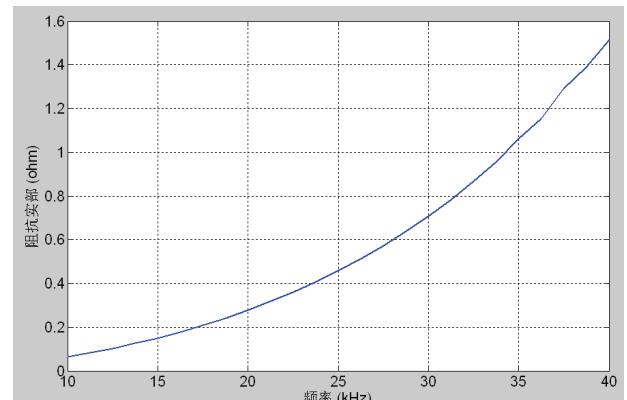
$$C = C_{\text{顶}} + C_{\text{垂}}$$

天线有效高度  $h_e$  与辐射电阻的关系可表示为：

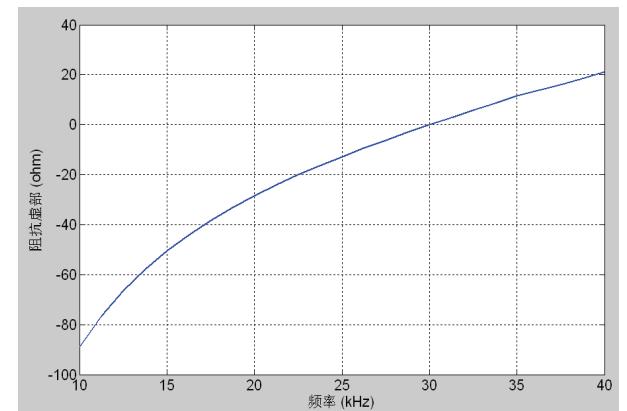
$$R_r = 160 \left( \frac{\pi h_e}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

式中， $\lambda$  是波长， $R_r$  是辐射电阻，从式 (2) 可以看到，辐射电阻与有效高度成正比，辐射电阻越大，天线的辐射能力越强，同等功率情况下，天线辐射的距离越远，其有效高度越高。

天线的自谐振频率  $f_0$  是天线输入电抗为 0Ω 时对应的工作频率。对图 1 中具有顶负载的垂直单极子天线，解析的方法是首先将水平部分的输入电抗转化为垂直增高部分的电抗，然后求整个天线的输入电抗，令之为 0Ω，即可求出天线的自谐振频率。



(a) 实部



(b) 虚部

图 2 支撑塔和纤绳均接地时，天线的阻抗特性

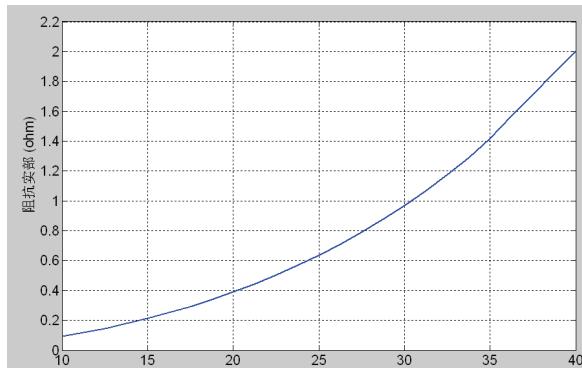
## 2 支撑塔接地/绝缘对电气性能的影响

利用 FEKO 软件对支撑塔及纤绳的影响进行数值分析, 仿真建模时对 NWC 天线进行了一定的简化, 目标是重点分析静态电容、有效高度和自谐振频率这几个参数的影响。

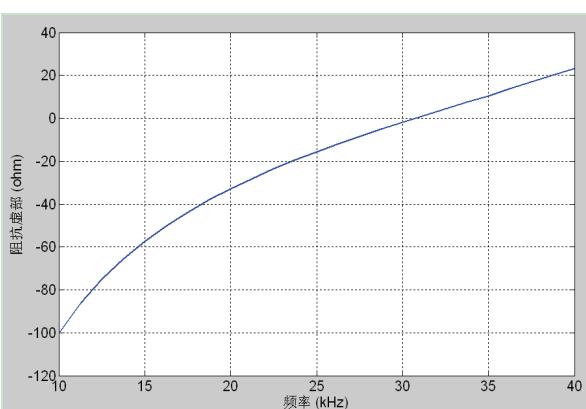
第一种状态, 如图 1 所示的 NWC 天线共有 13 座支撑塔, 在支撑塔及其纤绳都接地的情况下, 天线仿真的阻抗特性如图 2 所示。

从图 2 可以看到, 天线的自谐振频率为 30kHz。令天线的工作频率接近于 0, 计算得到天线的静态电容为 160nF。工作频率为 15kHz 时, 天线阻抗的实部为  $0.15\Omega$ , 虚部是  $-51\Omega$ , 天线的有效高度为 194.9m。

第二种状态, 将 13 座铁塔的纤绳绝缘, 即所有铁塔的三方五层纤绳与地面和铁塔都通过绝缘子进行连接, 电气上是断开的, 而铁塔本身接地, 使用 FEKO 软件仿真纤绳绝缘时的模型, 得到其阻抗特性如图 3 所示。



(a) 实部

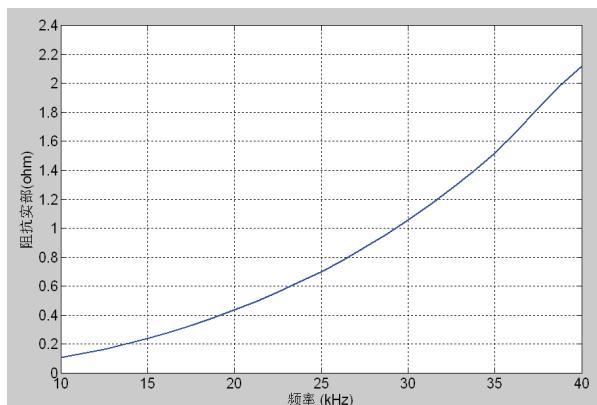


(b) 虚部

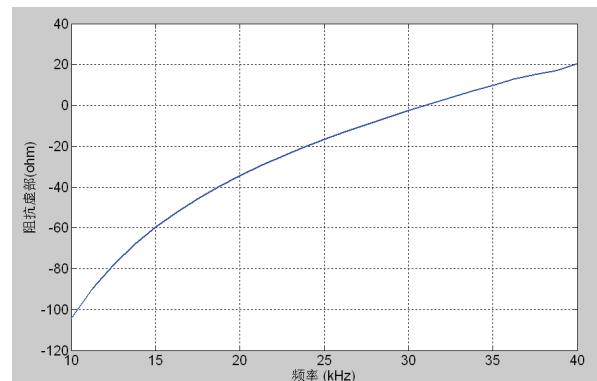
图 3 支撑塔接地、纤绳绝缘时, 天线的阻抗特性

从图 3 可以看到, 天线的自谐振频率为 30.7kHz。令天线的工作频率接近于 0, 计算得到天线的静态电容为 143.2nF。工作频率为 15kHz 时, 天线阻抗的实部为  $0.212\Omega$ , 虚部是  $-57\Omega$ , 天线的有效高度为 230.6m。

第三种状态, 在纤绳绝缘的基础上, 将铁塔的主体与地之间进行绝缘处理, 增加绝缘子底座, 使用 FEKO 软件仿真得到天线的阻抗特性如图 4 所示。



(a) 实部



(b) 虚部

图 4 支撑塔纤绳和铁塔都绝缘时, 天线的阻抗特性

从图 4 可以看到, 天线的自谐振频率为 31kHz。令天线的工作频率接近于 0, 计算得到天线的静态电容为 137.9nF。工作频率为 15kHz 时, 天线阻抗的实部为  $0.237\Omega$ , 虚部是  $-60\Omega$ , 天线的有效高度为 246.6m。

支撑塔及纤绳三种不同状态对天线电气性能的影响如表 1 所示。

从表 1 的数据可以看到, 当支撑塔和纤绳绝缘时, 天线的自谐振频率升高, 静态电容变小, 有效高度增大。支撑塔和纤绳均绝缘比仅纤绳绝缘的效果要更好, 但考虑支撑塔与地绝缘的难度更大, 可

以考虑仅做支撑塔纤绳的绝缘。

表 1 支撑塔及纤绳不同状态下天线的电气参数计算结果

状态	自谐振频率(kHz)	静态电容(nF)	有效高度(m)	相对比例
支撑塔及纤绳均接地	30	160	194.9	100%
支撑塔接地，纤绳绝缘	30.7	143.2	230.6	118%
支撑塔及纤绳均绝缘	31	137.9	246.6	126%

### 3 结论

本文使用基于矩量法的 FEKO 软件对 NWC 长波天线进行仿真计算, 分析了支撑塔及其纤绳绝缘对天线电气性能的影响, 通过计算可以发现支撑塔及纤绳的绝缘可以有效地提高天线的有效高度, 增加辐射能力, 通过将支撑塔纤绳绝缘可以获得较佳的性价比。尽管在实际长波天线工程中, 由于环境和施工影响, 包括支撑塔和纤绳接地、绝缘效果, 地网系统非理想地面, 接地体上反向感应电流的损耗等, 使得支撑塔和纤绳绝缘后有效高度提高的比例没有模型仿真的提高比例大, 同时兼顾工程施工

难度及维护性, 综合考虑是否采取绝缘措施, 但此项工作仍可以对长波天线工程建设起重要的指导作用。

### 参考文献:

- [1] Watt A D. 甚低频无线电工程[M]. 北京:国防工业出版社, 1973:87-122.
- [2] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播[M]. 海军工程大学电子工程学院, 2002.
- [3] Liu C, Liu Q.-Z. Numeric calculation of input impedance for a giant VLF T-type antenna array [J]. Progress in Electromagnetic Research, 2007, 75: 1-10
- [4] P. M. Hansen, J. Chavez. VLF Harold E. Holt Radhaz Measurements[R]. Technical Report, 1993.
- [5] J. W. Brooden, J. E. Raudenbush. Antenna Paramieters of the U.S. Navy VLF Transmitting Station, NWC, Harold E. Holt at Exmouth, Australia: U.S., AD0743884 [P]. 1972.
- [6] 王晓蓓, 柳超. 甚低频十三塔天线的特点与分析[J]. 舰船电子工程, 2009 (11):87-89.
- [7] 王东山. 大功率甚低频发信天线的若干问题[J]. 现代通信技术, 2011(1):1-4.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>